

압출성형 ECC 패널 RC 복합 슬래브의 해석모델

Analysis Model of Extruded ECC Panel RC Composite Slabs

조 창 근* 김 윤 용** 서 정 환*** 이 승 중****
Cho, Chang-Geun Kim, Yun-Yong Seo, Jeong-Hwan Lee, Seung-Jung

요 약

압출성형 ECC 패널을 활용한 철근콘크리트 복합 슬래브 구조에 대한 비선형 휨 해석 모델을 새롭게 제시하였다. ECC 패널은 직접인장시험 결과로부터 균열 이후에 고인성 인장거동을 하는 재료로 모델링하였다. 개발 모델을 기존 철근콘크리트 슬래브 및 ECC 패널 철근콘크리트 복합슬래브 실험체의 휨 실험결과와 비교하였다. 예측결과는 실험결과와 잘 일치하였으며, ECC 패널 적용 철근콘크리트 복합슬래브는 균열제어, 휨내력 및 휨변형능력 개선에 장점이 있는 것으로 판단되었다.

Abstract

A model for the nonlinear flexural analysis of extruded Engineered Cementitious Composite (ECC) panel reinforced concrete (RC) composite slab has been newly presented. From direct tensile test, ECC panel has been modeled to have the high-ductile tensile behavior after cracking. The developed model was compared with bending test results of two specimens, a conventional RC slab and a ECC panel RC composite slab. The predicted results were well patched with the experimental results, and the ECC panel RC composite slab system had advantages in crack control and improving flexural load-carrying capacity and deformation-capacity.

키워드 : 고인성시멘트복합체, 복합슬래브, 층상화휨해석, 장스팬바닥

Keywords : Engineered Cementitious Composite, Composite slab, Fiber flexural analysis, long-span slab

1. 서 론

최근 첨단재료공학 기술의 발전과 더불어 개발되는 섬유들은 인장강도 및 내구성이 우수하여 콘크리트 배합시 혼입할 경우 콘크리트의 단점인 취성 및 인장균열, 내구성 및 고성능 콘크리트 제조에 기여할 수 있다. 합성섬유를 혼입한 고인성 시멘트 복합체 (Engineered Cementitious Composite; 이하 ECC)는 시멘트 복합체에 균열 발생시 혼입된 합성 단섬유가 균열에서 가교작용을 하여 응력과 파괴에

너지를 부담하므로써 최초의 균열 발생 후에도 즉시 파괴에 도달하지 않고, 2차 균열이 유도한다. 이로 인해 ECC는 <그림 1>과 같이 기존 콘크리트와 같이 취성적으로 부러지는 파괴가 아니라 다중미세 균열(multiple micro cracks)의 거동을 하여 높은 휨 변형능력을 발휘하게 된다. <그림 2>는 변형경화형 시멘트 복합체 두 시험체의 직접인장실험에 의한 인장응력과 인장변형률 관계를 나타낸 것이다. 기존 콘크리트와 달리 본 재료는 2.6~2.8MPa 내외의 최초 인장균열강도에 도달한 후 곧바로 인장응력이 0이 되지 않고 인장변형률이 증가하여도 인장균열강도 내외의 인장응력을 유지하고 있는 변형률 경화 거동을 한 후 2% 이상의 인장변형률을 초과한 이후에 점차 인장응력 부담을 상실하고 있다^{1),2),3)}.

ECC의 높은 휨 및 인장 거동능력은 기존 철근콘

* 교신저자, 조선대학교 건축학부 교수
Tel: 062-230-7023 Fax: 062-230-7155
E-mai : chocg@chosun.ac.kr

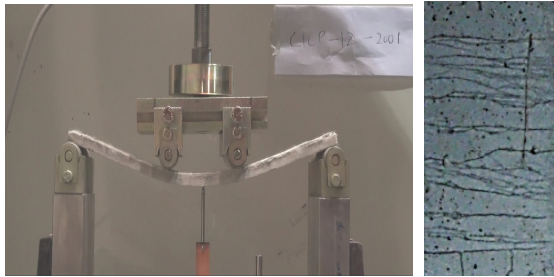
** 충남대학교 토목공학 교수

*** (주)동일구조 대표이사

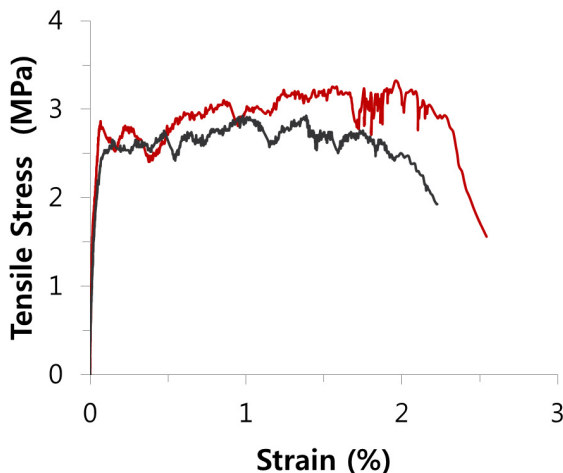
**** 조선대학교 건축학부 박사과정

크리트 슬래브와 조합하여 적용할 경우 대공간 구조용으로서 활용 가능한 철근콘크리트 슬래브의 장시간화가 가능할 뿐만 아니라 철근량 절감, 균열 제어효과 및 내구성 향상에도 기여할 수 있다.

선행 연구에서 저자 등은 ECC 패널의 고인성 거동특성 및 이를 적용한 슬래브 시스템의 휨성능 실험을 수행하였다^{4),5)}. 본 연구에서는 선행 연구를 기반으로 압출성형 ECC 패널을 적용한 철근콘크리트 복합바닥 슬래브의 비선형 거동 및 성능평가를 위한 비선형 해석모델을 제시하였다. ECC 패널 철근콘크리트 복합바닥슬래브 시스템에 대한 해석 모델을 전산 프로그래밍 하고, 그 결과를 슬래브 휨 재하실험 결과와 비교하여 검증토록 하였다. 본 논문은 해석모델의 정식화, 복합바닥슬래브 구조시스템의 휨 재하실험, 개발 모델의 성능평가 및 결론으로 구성되어 있다.



<그림 1> ECC의 고인성거동 및 다중미세균열

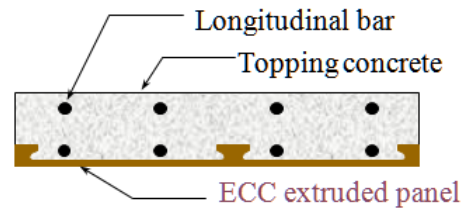


<그림 2> ECC의 인장균열 이후 고인성 인장
응력-변형률 거동특성

2. ECC-RC 슬래브 휨 해석 모델

본 장에서는 ECC 패널 철근콘크리트 복합 바닥 구조 시스템에 대한 비선형 휨 해석 모델에 관한 정식화를 다루고 있다.

본 연구에서 고려하는 복합슬래브 구조의 단면은 <그림 3>과 같이 슬래브의 인장 측 하단부에 압출성형가공을 통해 프리캐스트로 제작된 ECC 패널이 놓이고, 그 위에 종방향 및 횡방향 철근을 배근한 후에 후타설 콘크리트를 타설하여 제작된 복합 단면의 구조이다. 이때 ECC 패널은 <그림 4>와 같이 압출성형가공되어 프리캐스트로 제작되는데 상부 후타설 콘크리트와의 부착 및 합성효과를 높이기 위해 리브를 가진 형태로 되어 있다^{4),5)}.



<그림 3> ECC-RC 슬래브 복합단면



<그림 4> 압출성형 ECC 패널

복합슬래브단면의 비선형 휨 해석 모델의 정식화를 위해, 슬래브 단면의 콘크리트, 철근, 및 ECC 재료의 비선형 재료특성을 고려한 층상화 단면 휨 해석법을 <그림 5>와 같이 시도하였다^{6),7),8),9)}. 그림에서처럼, 단면의 임의 위치에서의 변형률 증분 $d\epsilon(z)$ 는 도심에서의 축변형률 증분 $d\epsilon_o$ 와 단면의 휨곡률 증분 $d\phi$ 의 합으로서 다음 식과 같다.

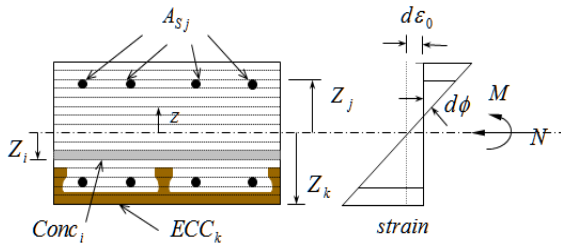
$$d\epsilon(z) = d\epsilon_o + z d\phi \quad (1)$$

단면에 작용하는 축방향 합력 N 및 모멘트 M 은 각각 다음 식과 같이 산정된다.

$$N = \int E d\varepsilon(z) dA \quad (2)$$

$$M = \int E d\varepsilon(z) z dA \quad (3)$$

여기서, E 는 단면 각 층(fiber)에 대응하는 콘크리트, 철근, 또는 ECC 재료의 탄성계수, z 는 기준축에서 대응하는 각 층까지의 거리이다.



<그림 5> 비선형 응상화 휨 해석모델

식 (1), (2) 및 (3)으로부터 응상화에 의해 유한분할화한 경우 축력의 유한증분 ΔN 은 다음 식과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \Delta N = & \left(\sum_{i=1}^{conc} f_{ci} A_{ci} + \sum_{j=1}^{As} f_{sj} A_{sj} \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^{ECC} f_{ECCk} A_{ECCk} \right) d\varepsilon_0 \\ & + \left(\sum_{i=1}^{conc} f_{ci} A_{ci} z_i + \sum_{j=1}^{As} f_{sj} A_{sj} z_j \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^{ECC} f_{ECCk} A_{ECCk} z_k \right) d\phi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $conc$, As , ECC 는 각각 콘크리트, 철근, 및 ECC 재료의 층수, f_{ci} , f_{sj} , f_{ECCk} 는 각각 콘크리트, 철근, 및 ECC 재료의 응력, A_{ci} , A_{sj} , A_{ECCk} 는 각각 콘크리트, 철근, 및 ECC 재료의 각 층 면적, 그리고 z_i , z_j , z_k 는 각각 콘크리트, 철근, 및 ECC 재료의 기준축에서 대응하는 각 층까지의 거리이다. 식 (4)는 ECC 패널의 폭을 변화시켜 ECC 전단연결재가 기여하는 면적을 계산에 고려하고 있다.

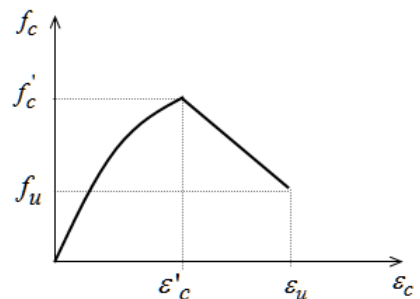
위 식들로부터 매 하중증분 단계에서의 평형조건을 만족하기 위한 축방향의 불평형력으로부터 기인되는 도심에서의 축변형률 유한증감 $\Delta\varepsilon_0$ 는 다음 식과 같이 유도된다.

$$\Delta\varepsilon_0 = (\Delta N - E_x \Delta\phi) / E_a \quad (5)$$

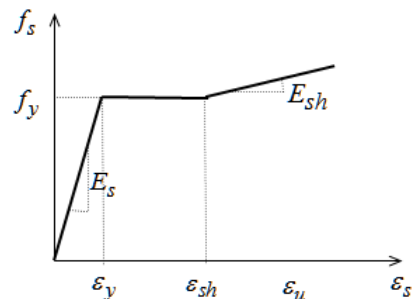
$$\begin{aligned} E_a = & \sum_{i=1}^{conc} f_{ci} A_{ci} + \sum_{j=1}^{As} f_{sj} A_{sj} \\ & + \sum_{k=1}^{ECC} f_{ECCk} A_{ECCk} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_x = & \sum_{i=1}^{conc} f_{ci} A_{ci} z_i + \sum_{j=1}^{As} f_{sj} A_{sj} z_j \\ & + \sum_{k=1}^{ECC} f_{ECCk} A_{ECCk} z_k \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 산정된 도심에서의 변형률 증분은 이전 단계에서의 값에 추가되어 갱신된 변형률 분포가 산정된다. 계산된 축력이 작용하는 축력과 같게 수렴할 때까지 반복 및 수렴 과정을 거쳐 비선형 증분 해석을 수행하도록 하였다.



(a) 콘크리트의 응력-변형률관계



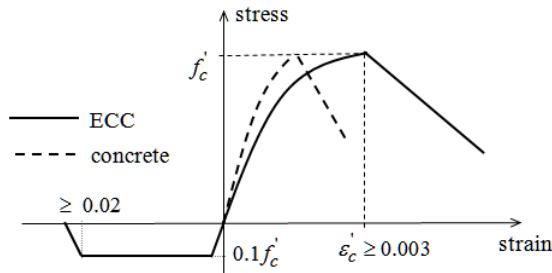
(b) 철근의 응력-변형률관계

<그림 6> 콘크리트 및 철근 응력-변형률 모델

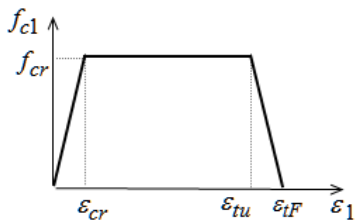
한편, 콘크리트 및 철근 재료의 비선형 재료특성을 고려하기 위하여 <그림 6>과 같이 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계곡선을 고려하였다. 콘크리트의 압축 응력-변형률 관계는 일축압축강도 f'_c 에 도달할 때까지는 식 (8)과 같이 2차포물선 곡선으로 고려토록 하였고, f'_c 에 도달 이후에는 직선적으로 극한응력 f_u 까지 선형적으로 감소하는 것으로 고려하였다.

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (8)$$

철근의 경우는 항복응력 f_y 에 도달할 때까지 선형탄성거동을 하다가 항복 이후 직선적으로 증가하는 소성거동을 하는 것으로 고려하였다.



(a) ECC의 압축 및 인장 특성



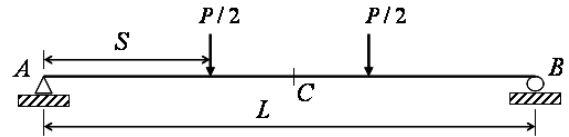
(b) ECC의 인장 응력-변형률 관계

<그림 7> ECC의 응력-변형률 관계 모델

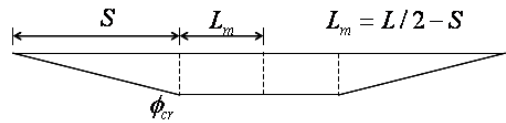
ECC 재료의 경우 <그림 7>과 같이 압축 축 거동은 일축압축강도에 대응하는 압축변형률이 0.003 내외로서 일반 콘크리트의 0.002 보다 큰 것을 제외하면 일반 콘크리트와 비슷하게 고려할 수 있다. 하지만 인장 축은 그림과 같이 균열 발생 이후에도 다중 미세균열의 거동으로 인해 인장변형률 0.02 이상에 도달할 때까지 인장응력을 부담할 수 있는 고인성

시멘트복합체로 고려하여 인장 응력-변형률 관계를 모델링하였다.

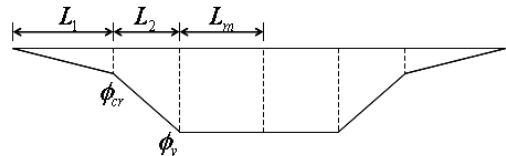
이상에서 소개한 층상화 단면 휨해석 모델로부터 슬래브 복합단면에서의 비선형 휨 모멘트-곡률 관계 거동에 관한 예측이 가능하다.



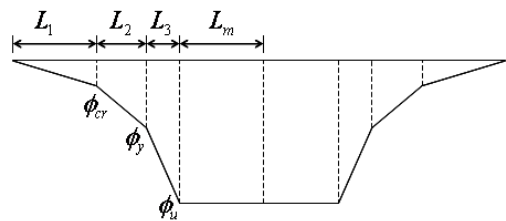
(a) 4절점 휨하중 조건



(b) 최초균열 발생시



(c) 최초 인장철근 항복시



(d) 극한하중 도달시

<그림 8> 단계별 휨곡률 분포 모델

한편 <그림 8>과 같이 단순지점의 슬래브가 4점 휨 재하시험을 수행하는 경우 최초 인장균열이 발생한 경우, 최초 인장철근이 항복한 경우, 그리고 극한하중에 도달한 경우에서의 휨 곡률 분포를 그림에서 처럼 각각 가정할 수 있다. 이때 최초 균열 발생 시의 휨곡률 ϕ_{cr} , 최초 인장철근 항복 시의 휨곡률 ϕ_y , 그리고 극한하중에 도달 시의 휨곡률 ϕ_u 값은 앞에서 소개한 층상화 단면 휨 해석을 통해 단계별로 추정된다. 이렇게 추정된 단계별 휨 곡률

산정 값과 <그림 8>의 각 단계별 휨 곡률 분포로부터 슬래브의 A점 처짐각 θ_A 및 지간 중앙 C점에서 연직방향 처짐 Δ_C 를 각각 단계별로 다음 식들과 같이 유도하여 산정할 수 있다.

최초 균열 발생시;

$$\theta_A = \phi_{cr} \left(\frac{1}{2}S + L_m \right) \quad (9)$$

$$\Delta_C = \frac{1}{2}\theta_A L - \phi_{cr} \left[\frac{1}{2}S L_m + \frac{1}{6}S^2 + \frac{1}{2}L_m^2 \right] \quad (10)$$

인장철근 항복시;

$$\theta_A = \frac{1}{2}\phi_{cr} L_1 + \frac{1}{2}(\phi_{cr} + \phi_y) L_2 + \phi_y L_m \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta_C = & \frac{1}{2}\theta_A L - \frac{1}{2}\phi_{cr} L_1 \left(L_m + L_2 + \frac{1}{3}L_1 \right) \\ & - \phi_{cr} L_2 \left(L_m + \frac{1}{2}L_2 \right) \\ & - \frac{1}{2}(\phi_y - \phi_{cr}) L_2 \left(L_m + \frac{1}{3}L_2 \right) \\ & - \phi_y L_m \left(\frac{1}{2}L_m \right) \end{aligned} \quad (12)$$

극한하중 상태;

$$\begin{aligned} \theta_A = & \frac{1}{2}\phi_{cr} L_1 + \frac{1}{2}(\phi_{cr} + \phi_y) L_2 \\ & + \frac{1}{2}(\phi_y + \phi_u) L_3 + \phi_u L_m \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta_C = & \frac{1}{2}\theta_A L - \frac{1}{2}\phi_{cr} L_1 \left(L_m + L_3 + L_2 + \frac{1}{3}L_1 \right) \\ & - \phi_{cr} L_2 \left(L_m + L_3 + \frac{1}{2}L_2 \right) \\ & - \frac{1}{2}(\phi_y - \phi_{cr}) L_2 \left(L_m + L_3 + \frac{1}{3}L_2 \right) \\ & - \phi_y L_3 \left(L_m + \frac{1}{2}L_3 \right) \\ & - \frac{1}{2}(\phi_u - \phi_y) L_3 \left(L_m + \frac{1}{3}L_3 \right) - \phi_u L_m \left(\frac{1}{2}L_m \right) \end{aligned} \quad (14)$$

이상으로부터, 4점 휨 재하시험을 받는 단순 슬래브 시스템의 연직방향 하중-처짐 관계에 관한 비선형 거동 예측에 관한 정식화 및 해석모델을 제시하였다.

3. ECC-RC 슬래브 휨 재하시험

개발된 ECC 패널 철근콘크리트 복합바닥 슬래브의 비선형 해석모델을 검증하기 위해 본 연구와 연계하여 수행된 복합바닥 슬래브에 대한 4점 휨 재하시험을 수행하였다⁵⁾.

<그림 4>와 같이 압출성형 제작된 ECC 패널은 보통 포틀랜드 시멘트와 ECC 파우더를 결합재로 사용하였으며, 밀도 2.66g/cm³, 비표면적 3,793cm²/g 인 규사미분(Silica Powder: K사)과 밀도 2.64g/cm³, 평균입경 0.2mm인 규사(Silica sand)를 골재로 사용하였다. 섬유는 인장강도 1,700 MPa의 고장력 PVA 섬유로 직경 39 μ m 길이 6~8mm를 이용하였고, ECC 배합 결합재 체적의 2.0%를 혼입하였다. 본 배합의 ECC 재료에 대한 직접인장시험결과 <그림 2>와 같이 고인성인장변형률 0.02를 발휘하였다.



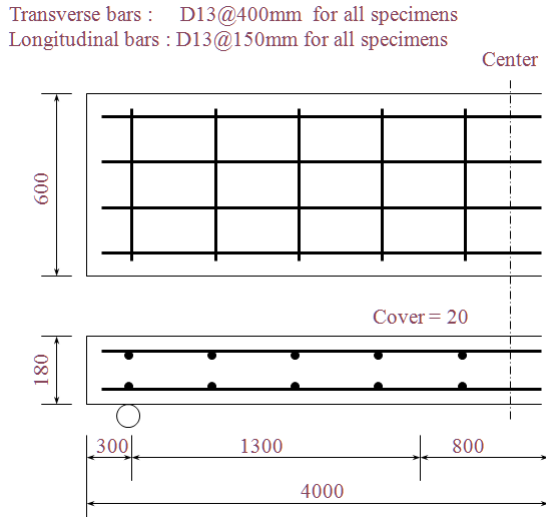
(a) ECC 패널 (b) 상부 콘크리트 타설 및 철근 배근
및 시험체 완성

<그림 9> ECC-RC 복합슬래브 실험체 제작

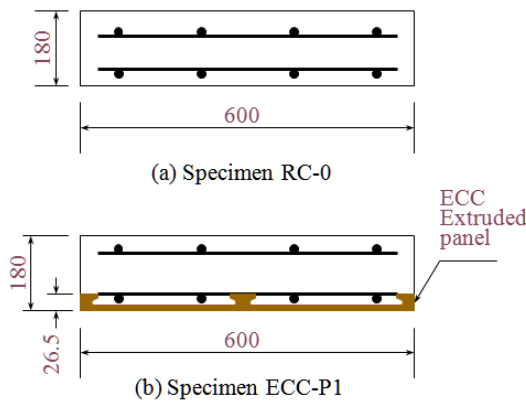
압출성형 ECC 패널의 단면형상은 상부의 철근 배치와 후타설 콘크리트와의 부착 등을 고려하여 3개의 돌출부를 갖고 있으며, <그림 9>와 같이 거푸집에 ECC 패널을 놓고 그 위에 철근을 배근한 후 상부 콘크리트를 후타설하여 실험체를 제작 및 양생하여 완성하였다.

본 해석모델과의 비교에 고려된 슬래브 실험체는 두께 180mm, 폭 600mm, 순경간 3,400mm 규격으로 배근상세는 <그림 10>과 같다. 표준 RC 슬래브 시험체 RC-0 및 ECC 패널을 적용한 복합슬래브 실험체 ECC-P1 두개의 실험체의 단면상세는 <그림

11>과 같으며, ECC-P1 실험체의 경우 단면 하부에 총 25.6mm 두께의 압출성형 ECC 패널이 적용된 하프 프리캐스트 제작 실험체이다.



<그림 10> 슬래브 실험체의 배근상세

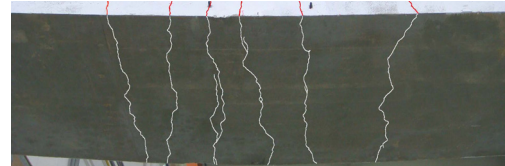


<그림 11> 각 슬래브의 단면상세

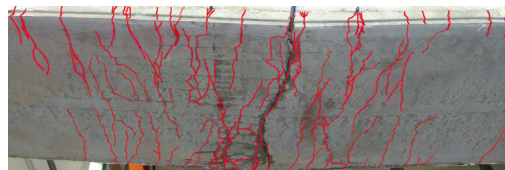
2개의 1방향 슬래브 실험체를 순지간 3,400mm 및 전단지간 1,300mm를 갖는 단순지간의 4점 휨 재하실험을 수행하였다.

재하시험 결과, 파괴시 두 실험체의 중앙지간 부근에서의 휨 균열 분포를 <그림 12>에 나타내었다. 표준 철근콘크리트 슬래브인 RC-0 실험체는 지간중앙에서 초기균열 발생 후 하중증가와 함께 균열이 상부로 확대되었고, 약 100mm~150mm 간격으로 균열이 추가 발생하였다. 하중 증가에 따라 기존 균열의 폭이 점차 증가하면서 철근 항복 이후 급격한 균

열폭 증가현상을 보이면서 최종적으로 중립축이 급상승하여 콘크리트가 압축 파괴되는 휨 파괴에 도달했다.



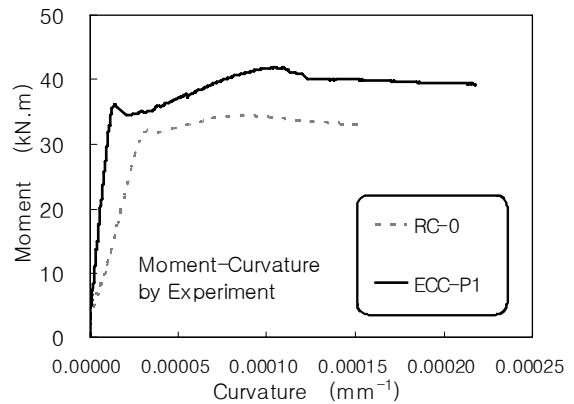
(a) RC-0 실험체 균열양상



(b) ECC-P1 실험체 균열양상

<그림 12> 슬래브 시험체 균열분포

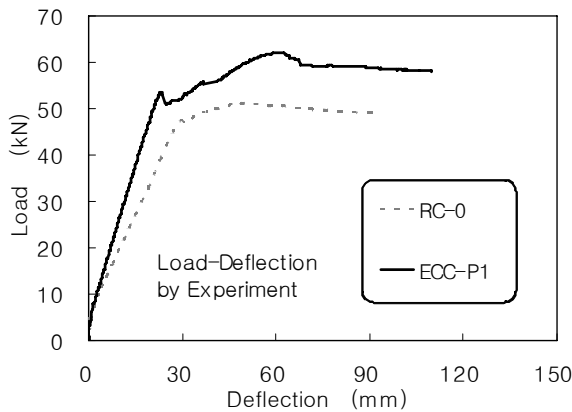
ECC-P1 실험체는 초기균열이 지간중앙의 ECC 패널에 발생하면서, 하중증가와 함께 다중미세 휨 균열이 무수히 발생하면서 균열 수가 증가하였으나, 균열 폭의 증가는 육안으로 관찰되지 않았다. 인장 철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하였으며, 다중미세균열 거동으로 처짐 110mm까지 안정적인 연성 거동을 보였다.



<그림 13> 모멘트-곡률관계 실험결과

두 실험체의 지간중앙에서 측정된 모멘트-곡률 및 수직 하중-처짐 관계에 대한 재하실험 결과를 각각 <그림 13> 및 <그림 14>에 나타내었다.

RC-0 실험체에 비해 ECC-P1 실험체의 항복강도는 1.13배 최대내력은 1.21배 증가된 결과를 보였다. 두 실험체의 연성도 $\mu = \phi_u / \phi_y$ 의 평가에서, ECC-P1 실험체의 연성도는 13.37 로써 RC-0 실험체의 4.95 보다 2.70배 향상되어, ECC 패널을 적용한 복합바닥 슬래브가 균열폭의 증가를 억제하여 휨 내력 및 휨 변형능력이 향상된 것으로 나타났다.



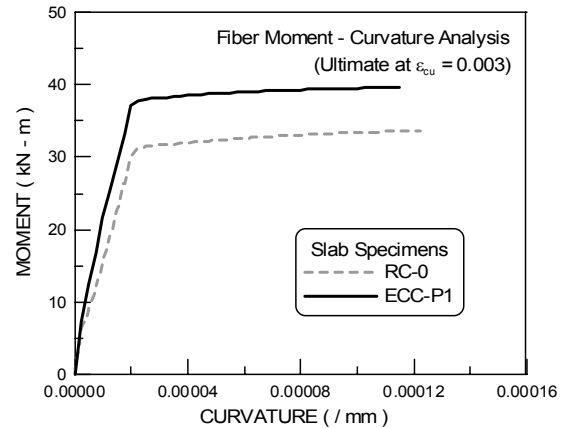
<그림 14> 하중-처짐 관계 실험결과

4. ECC-RC 슬래브 휨 해석결과

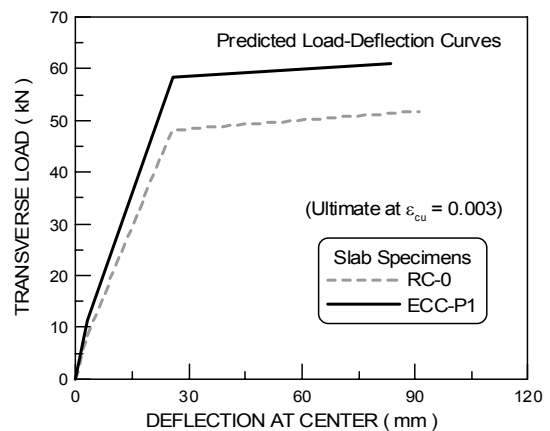
앞 장에서 소개된 RC-0 실험체 및 ECC-P1 실험체의 단순지점인 경우 4점 휨 슬래브 재하실험과 동일한 조건으로 3장에서 개발된 비선형 해석모델에 의해 슬래브 휨 해석을 수행토록 하였다. 본 해석에서, 슬래브 실험체의 극한하중 상태는 콘크리트 구조설계기준에 준하여 콘크리트의 압축변형률이 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에 도달하는 경우 압축 휨 파괴가 일어난 것으로 보고 해석을 중지하였다¹⁰⁾.

비선형 휨 해석 결과, 두 실험체의 모멘트-곡률 관계 및 수직방향 하중-처짐 관계에 대한 극한하중에 도달될 때까지의 예측 결과를 각각 <그림 15> 및 <그림 16>에 나타내었다. 실험에서처럼 해석결과에서도 ECC 패널을 적용한 ECC-P1 실험체의 경우가 표준 철근콘크리트 슬래브인 RC-0 실험체에 비해 인장철근 항복시 1.15배 그리고 극한하중시 1.14배 정도로 휨 내력이 향상된 거동을 나타낸 것으로 예측되었다. 해석 및 실험결과의 하중-처짐 관계 결과 그래프의 비교에서 알 수 있듯이, 본 해석

모델은 두 실험체 모두에서 초기균열 발생 단계 및 균열 발생 이후의 휨강성 변화 예측에 있어서도 비교적 실험 결과를 잘 예측해 주었다.



<그림 15> 모멘트-곡률관계 해석결과



<그림 16> 하중-처짐 관계 해석결과

5. 결론

비선형 층상화 휨 해석모델에 의한 ECC 패널을 적용한 철근콘크리트 복합바닥 슬래브구조에 대한 해석모델을 개발하여 그 성능을 실험과 비교하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ECC재료의 고인성 인장거동, 콘크리트 및 철근의 비선형 재료특성을 반영한 층상화 단면 휨해석을 기반으로 하여 모멘트-곡률 관계 거동을 예측하고, 단순지점 조건의 4점 재하 슬래브인 경우 최초균열, 인장철근항복, 및 극한하중 단계에 따른 휨곡률 분포 특성으로부터

- 수직방향 하중-처짐 관계 예측이 가능한 반복 증분 비선형 휨 해석 모델을 제시하였다.
- 2) 개발된 비선형 휨 해석 모델은 철근콘크리트 슬래브 실험체 뿐만 아니라 ECC 패넬을 적용한 철근콘크리트 복합 슬래브 실험체의 비선형 휨내력 및 휨변형 관계를 비교적 잘 예측해 주었다.
 - 3) ECC 패넬을 적용한 철근콘크리트 복합슬래브 구조는 기존 철근콘크리트 슬래브 구조와 비교하여 휨 내력 및 휨 변형능력에서 우수한 것으로 평가되었다. 이는 ECC 패넬을 적용한 철근콘크리트 복합 슬래브 시스템의 경우 고인성시멘트복합체의 다중미세균열 거동 특성에 의한 슬래브 인장 하단부의 휨 균열 제어효과로 하중 증가에도 불구하고 균열폭의 증가를 완화하여 전체적으로 휨 내력 향상과 안정적인 휨 변형능력을 확보해 주는 것으로 판단된다.
 - 4) ECC 패넬의 경량 및 고인성 거동 특성으로 인해 본 연구에서 소개한 철근콘크리트 복합슬래브 형식은 대공간구조물에 적용가능한 장지간 슬래브 공법화에도 활용가능하다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 11CHUD-C058205-01)에 의해 수행되었습니다. 또한 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0020027)

참고문헌

1. Li, V.C., Hashida, T., Engineering Ductile Fracture in Brittle Matrix Composites, Journal of Materials Science Letters, Vol. 12, pp.898~901, 1993
2. Cho, C.G., Ha, G.J., Kim, Y.Y. Nonlinear Model of Reinforced Concrete Frames Retrofitted by In-Filled HPRCC Walls, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 30, No. 2, pp.211-223, 2008
3. 조창근, 김윤용, 섬유보강 고인성시멘트복합체패넬의 2축 전단 비선형 모델, 한국전산구조공학회 논문집 제22권 제6호, pp. 597-605, 2009
4. 이방연, 한병찬, 조창근, 권영진, 김윤용, 압출성형 ECC 패넬의 섬유분산 특성과 그에 따른 휨 성능, 콘크리트학회 논문집, Vol. 21, No. 5, pp.573-580, 2009
5. 조창근, 한병찬, 이정환, 김윤용, 압출성형 ECC 패넬을 이용하여 제작된 복합바닥슬래브의 휨 거동, 콘크리트학회 논문집, Vol. 22, No. 5, pp.695-702, 2010
6. 조창근, FRP 콘크리트 복합구조 부재시스템의 휨 및 전단 거동예측, 대한건축학회 구조계논문집, 20권, 8호, pp.35-42, 2004
7. Cho, C.G., Kwon, M., Development and Modeling of Frictional Wall Damper and Its Application in R/C Frame Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, No. 7, pp.821-838, 2004
8. Cho, C.G., Kwon, M., Prediction of Nonlinear Bending Behavior for FRP Concrete Beams based on Multi-axial Constitutive Laws. Engineering Structures, Vol. 30, pp.2311-2320, 2008
9. Cho, C.G., Kwon, M., Nonlinear Failure Prediction of Concrete Composite Columns by a Mixed Finite Element Formulation, Engineering Failure Analysis, Vol. 18, pp.1723-1734, 2011
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 2008, 523pp.

(접 수 일 자 : 2011년 10월 18일)
 (심사완료일자 : 2012년 02월 20일)
 (게재확정일자 : 2012년 02월 24일)